文章编号:1000-4939(2023)05-1096-10

基于改进山本法的浅埋隧道支护结构受力特性研究

谢云鹏[1],陈秋南[1],汪祥国[2],舒明旺[3],贺泳超[1],付相威[2],黄小城[1],陈正红[1]

(1 湖南科技大学土木工程学院,411201 湘潭;2. 中铁十一局集团第二工程有限公司,442000 十堰;3. 上饶市赣东公路工程咨询有限公司,334000 上饶)

摘 要:隧道支护结构计算时常假定为正圆形,但与工程实际存在差异。本研究结合谢家烋围岩压力计算理论,改进日本山本法支护结构计算模型,提出一种山岭浅埋隧道三心圆支护结构计算模型。应用于某红黏土隧道支护结构,将改进山本法计算结果与山本法、隧道设计规范电算结果和现场实测值比对。研究结果表明:改进山本法所得围岩压力和支护结构轴力结果与实测数据最接近,最大误差 12.9%,且趋于安全;改进山本法所得弯矩结果显示拱脚处弯矩最大,与现场结构破坏形式相符;根据计算结果确定荷载集中部位,制定专项加固方案,保证隧道施工和运营安全。研究成果可为优化类圆形隧道断面理论提供参考,为隧道支护结构计算提供一种新方法。

关键词:隧道工程;支护结构;山本法;三心圆模型

中图分类号:TU451.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.015

Study on mechanical characteristics of improved shallow tunnel supporting structure based on Yamamoto method

XIE Yunpeng[1], CHEN Qiunan[1], WANG Xiangguo[2], SHU Mingwang[3], HE Yongchao[1], FU Xiangwei[2], HUANG Xiaocheng[1], CHEN Zhenghong[1]

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China;
2. China Railway 11th Bureau Group II Engineering Co., Ltd., 442000 Shiyan, China;
3. Shangrao Gandong Highway Engineering Consulting Co., Ltd., 334000 Shangrao, China)

Abstract: The calculation of tunnel support structure is often assumed to be positive circular, but it is different from the actual engineering. Based on the theory of surrounding rock pressure calculation, this paper improves the calculation model of support structure of Japanese Yamamoto method, and puts forward a calculation model of three-center circular support structure of shallow buried tunnel in mountain. The results of the improved method are compared with those of the method, the code of tunnel design and the measured values. The results show that the surrounding rock pressure and axial force of supporting structure are

收稿日期:2020-09-25 **修回日期**:2020-12-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52078211;51909087);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4021);湖南省交通厅科技进步与创新资助项目(No. 201712)
通信作者:陈秋南,博士生导师。E-mail:cqndoc@163.com
引用格式:谢云鹏,陈秋南,汪祥国,等.基于改进山本法的浅埋隧道支护结构受力特性研究[J].应用力学学报,2023,40(5):1096-1105.
XIE Yunpeng, CHEN Qiunan, WANG Xiangguo, et al. Study on mechanical characteristics of improved shallow tunnel supporting structure based on Yamamoto method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1096-1105.

the closest to the measured data, the maximum error is 12.9%, tend to be safe. According to the calculation results, the load concentration is determined and the special reinforcement scheme is made to ensure the safety of tunnel construction and operation. The research results can provide a reference for optimizing the theory of circular tunnel section and a new method for calculating tunnel support structure.

Key words: tunnel engineering; supporting structure; Yamamoto method; three-dimensional circle model

隧道支护结构一般是受围岩约束的拱形结构，其复杂的受力分析得到广泛学者关注[1-4]。在隧道结构受力理论计算时，因断面形状复杂故常将其简化为正圆型或直墙拱形进行计算[5-6]。但简化模型计算结果与现场施工中常出现较大差距，不能有效判断支护结构薄弱部位[7-8]，故需要优化支护结构受力计算分析。

目前国内外学者常通过理论分析、数值计算和模型试验等方式对隧道围岩压力和支护结构应力进行研究。谢家烋[9]推导出考虑了土质黏聚力和内摩擦角、洞顶荷载和地面坡度等因素的浅埋隧道地层垂直压力和侧压力计算公式。于丽等[10]基于极限平衡理论推导浅埋黄土隧道围岩压力的计算方法，并与现场实测值和既有的谢家烋法、太沙基法进行对比验证。李君杰等[11]结合统一强度理论，考虑宏细观损伤因子、水渗透压力和中间主应力，推导了含裂缝区围岩应力、洞室位移和围岩抗力计算表达式。邵珠山等[12]以围岩加固和变形能量释放为原则，推导了在基于注浆加固与可压缩层联合作用下的应力场和位移场的解析解。高卫亮等[13]基于现场数据，采用数值分析方法研究了侧爆作用下隧道衬砌弯矩和锚杆轴力的动态相应规律，得出了衬砌结构所受弯矩作用情况。文竞舟等[14]运用弹性地基曲梁理论，通过测定喷射混凝土与围岩接触应力推导结构应力的解析解，从而确定应力集中部位，方便后续指定安全措施。文献[15-16]应用极限分析上限法构造了围岩压力计算模型，同时指出在运用极限分析法处理浅埋隧道围岩压力问题时，隧道底部支护会对整个围岩压力产生影响。孙富学等[17]利用曲梁初参数矩阵方程，求解出了矩阵方程中初参数值，进一步求解得到多心圆拱弧段的应力与变位值。陈一鑫等[18]基于初参数法和现场围岩量测压力，从理论上推导了多心圆拱隧道支护结构应力计算的反演表达式。虽然现有学者对多心圆拱隧道的进行了结构应力分析研究，但未考虑围岩土质参数或是基于实测数据进行计算。故本研究基于日本山本法提出一种考虑隧道所在地层土质参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的三心圆支护结构应力计算模型，并验证其适用性。研究成果可为以圆形隧道断面为假设的其他理论进一步优化提供一种参考，为隧道支护结构计算提供一种理论计算方法。

1　工程概况

1.1　依托工程

本研究依托工程为江西省萍乡-莲花高速公路某隧道，该隧道地处罗霄山脉，为分离式隧道，隧道净空(10.25×5.0) m，隧道(左线)长 3 200 m，最大埋深约 317 m，最小埋深约 26 m，Ⅴ级围岩，采用上下台阶钻爆法施工。隧址内围岩以红黏土、强风化砂岩和中风化砂岩为主，围岩物理力学参数如表 1 所示。红黏土为洞身主要分布地层，红黏土段约占总长的 45%。隧区地表植被发育，萍水(渌水)是隧区内主要水系，流水量大于 5×10^6 kg/d 以上。雨季降水量大，充沛的雨水影响了红黏土隧道围岩稳定，出现围岩大变形和浅埋段冒顶塌方等多处工程灾害。

表 1　围岩物理力学参数

Tab. 1　Physical and mechanical parameters of adjacent rock

围岩	容重 $\gamma/(\mathrm{N\cdot m^{-3}})$	黏聚力 c/kPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(°)$	弹性模量 $E/(\mathrm{kN\cdot m^{-2}})$
红黏土	20.00	52.60	0.30	20.60	1.5×10^4
强风化砂岩	23.00	35.00	0.35	28.00	5.0×10^5
强风化砂岩	24.00	40.00	0.35	32.00	8.0×10^5

1.2 围岩大变形情况

隧道出口红黏土围岩段出现围岩大变形并侵入限界，拱顶及侧墙衬砌结构开裂、支护结构变形等不良工程现象，如图 1 所示，影响了支护结构的耐久性和承载力。由隧道监控量测数据显示（图 2）位于 ZK38 + 000 ~ ZK38 + 340 的浅埋段，在开挖初期20 天内，多断面发生土质围岩大变形。其中，ZK38 + 120 断面，沉降累积值为 993.80 mm；其两侧的ZK38 + 125、ZK38 + 115 断面，拱顶沉降累积值分别为 604.60、586.30 mm。均为工程中鲜有的拱顶沉降大变形，引起施工与管理人员的高度重视。

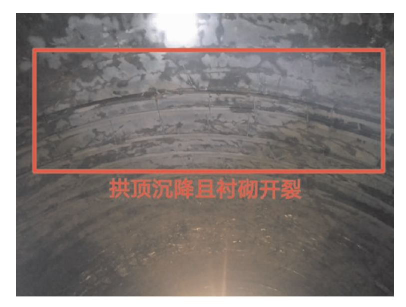


图 1　典型断面拱顶沉降

Fig. 1　Cracking of arch roof in typical section

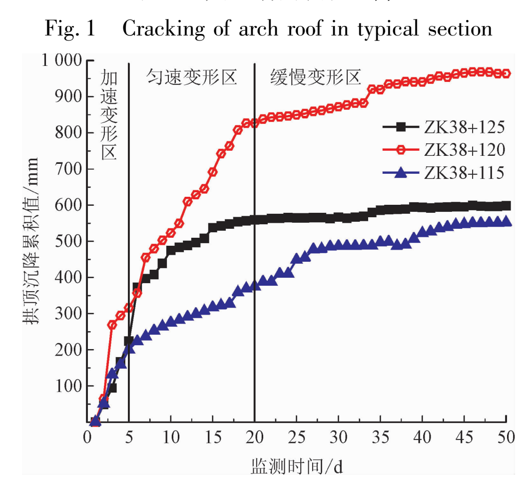


图 2　拱顶沉降监测曲线图

Fig. 2　The monitoring curve of dome settlement

以围岩变形最大的 ZK38 + 120 断面为例，当隧道自上台阶开挖至下台阶的前20 天中围岩处于快速变形期，呈现变形速率快，日沉降值大，支护结构承担围岩压力增大的特点。拱顶沉降最大值达到 882.40 mm，占总变形值的 91.54%。且日沉降量超出预警值，开挖第三天沉降速率为 204.4 mm/d，开挖第7 天沉降速率为 98.6 mm/d，现场发生小范围初支混凝土掉落。说明原设计中的支护结构不足以抵抗隧道开挖后的围岩压力，无法有效控制红黏土围岩变形。

1.3 红黏土物理力学参数测定

为了对隧道围岩压力作出准确计算，收集隧道内原位红黏土土样进行天然含水率测定试验和室内直剪试验，测定洞内原位红黏土的含水率 ω、黏聚力 c 和内摩擦角 φ。

本研究含水率试验严格参照《土工试验规程》，为保证原位土样含水率使用土工布覆盖土样，测得天然含水率为 34.6%。直剪试验使用 ZJ 型电动应变控制式直剪仪，其中环刀规格为直径 6.18 cm，高 2.00 cm，量力环系数为 1.923 kPa/0.01 mm。分别对土样施加 100、200、300、400 kPa 的垂直荷载，以 0.8 mm/min 的速率进行直剪试验，如图 3 所示。将数据采用 origin 软件进行拟合，拟合结果如图 4 所示。



(a) ZJ型应变控制式直剪仪



(b) 试验试样

图 3　室内直剪试验

Fig. 3　Indoor direct shear test

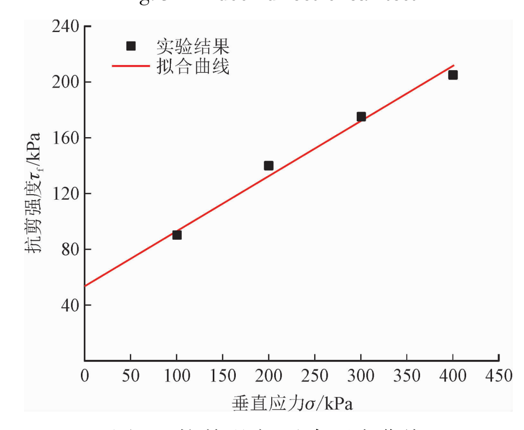


图 4　抗剪强度-垂直压力曲线

Fig. 4　Shear strength-vertical pressure curve

拟合曲线为 $y = 0.39x + 53.62(R^2 = 0.985)$，故根据 Mohr—Coulomb 准则(式 1)，得出现场红黏土的抗剪强度指标即黏聚力 c 和内摩擦角 φ，如表 2 所示。

$$\tau_f = \sigma\tan\varphi + c \tag{1}$$

式中：τ_f为抗剪强度值；σ 为垂直应力；c 为土的黏聚力；φ 为土的内摩擦角。

表 2　红黏土物理力学参数

Tab. 2　Physical and mechanical parameters of red clay

土样	天然含水率 ω/%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
红黏土	34.60	53.62	21.55

根据测定得到的所依托隧道工程围岩红黏土力学参数，可进一步计算得到较为准确的工程围岩压力值，通过合理的支护结构受力计算分析可以验证支护结构的稳定性，进而对支护方案作出优化。

2　改进山本法隧道支护结构计算模型

日本山本法是将隧道支护结构按多铰圆环计算的一种方法[5]，但其围岩压力计算未考虑围岩土质具体参数，且存在支护结构为正圆环的假定条件，使该计算方法存在一定的局限性。故本研究基于山本法对结构模型和围岩压力计算进行改进：首先结合谢家烋围岩压力计算理论[9]，引入土质围岩黏聚力 c 和内摩擦角 φ 参量，计算具体的围岩压力值；其次将正圆形计算模型改进为三心圆计算模型；最终构建改进山本法的浅埋隧道支护结构三心圆计算模型。

2.1　山本法

日本山本(稔)法[5]以正圆环为基础计算模型(图 5)，计算原理是圆环型隧道支护结构受主动土压力和被动土压力作用下而发生的变形，支护结构由不稳定结构逐步转变为稳定结构。计算中的几个假定：①支护结构为正圆环结构；②支护结构环在转动时，支护结构视作刚体；③支护结构环外围土抗力按均变形式分布，土抗力的计算要满足对砌环稳定性的要求，土抗力作用方向全部朝向圆心；④计算中不计支护结构环与土质间的摩擦力；⑤土抗力和变形关系按 Winkler 模型计算。

将支护结构环按图 5 截面分为三环结构，根据各截面所处地层土质所提供的弹性抗力，计算出各截面上的 M、N、Q 值和径向位移。再对结构强度进行检验，并满足变形及稳定要求。

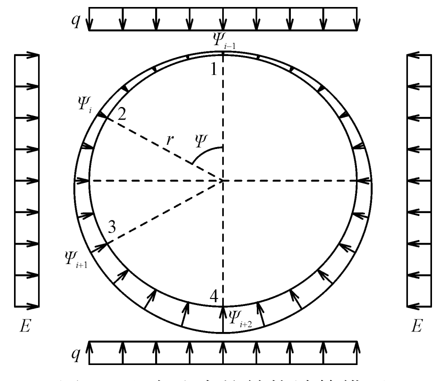


图 5　山本法支护结构计算模型

Fig. 5　Calculation model of support structure by Yamamoto

2.2　围岩压力计算

确定围岩压力是计算浅埋隧道支护设计荷载的前提，其中 Bierbaumer、Terzaghi 和谢家烋等围岩压力计算方法应用最广泛[10]。但 Bierbaumer 理论未考虑土质黏聚力 c 影响，Terzaghi 理论中侧压力系数 K 是经验数字且未考虑黏聚力 c 影响[9]，与实际工程偏差较大，故本研究采用考虑了土质黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的谢家烋方法对浅埋隧道垂直及侧向围岩压力进行计算，如图 6 所示。

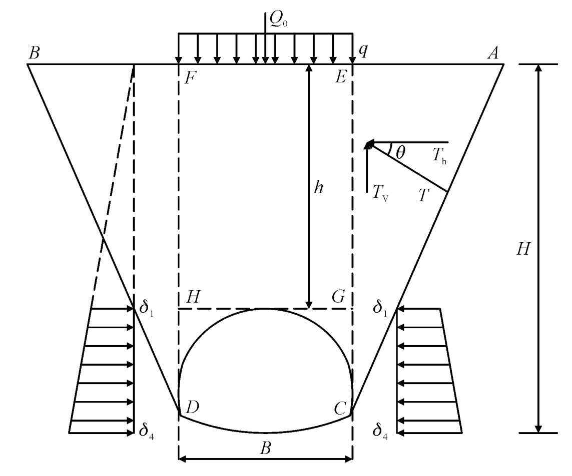


图 6　谢家烋围岩压力计算模型

Fig. 6　Calculation model of surrounding rock pressure of XIE Jiaxiao

垂直土压力为

$$P = h(\gamma B - 2c) + qB + Q_0 - 2T\sin\theta\left(\frac{h}{H}\right)^2 \tag{2}$$

式中：h、H、B 如图 6 所示；γ 为容重；c 为黏聚力；θ 为破裂面摩擦角；q、Q_0分别为地面均布荷载和集中荷载；T 为中部柱体 $EGHF$ 两侧垂直摩阻力 T_v和水平法向力 T_h的合力。

水平侧压力为

$$\delta_1 = \frac{2Th\cos\theta}{H^2} - q\lambda\left(\frac{2h}{H} - 1\right) \quad (3)$$

$$\delta_4 = \frac{2T\cos\theta}{H} - q\lambda \quad (4)$$

式中,$\delta_i(i=1,2,3,4)$为侧压力,δ_1、δ_4分别为拱顶和拱底侧压力,δ_2、δ_3 可根据梯形计算公式得到。

2.3 改进山本法

通常山区隧道支护结构非正圆形,本研究将支护结构简化为受垂直荷载和水平侧压力的多铰三心圆模型,分别对半径为 $r_i(i=1,2,3)$,圆弧所对应圆心角为 $\psi_i(i=1,2,3)$的 3 部分模型进行受力分析。其中假定:①支护结构在转动时视为刚体,且不考虑自重;②土抗力计算满足稳定性要求;③适用于非偏压隧道,受力轴对称分布。

本研究取轴对称左侧按不同半径分为 3 段计算,如图 7 所示。

本节符号继承 2.2 节中符号注释。α 为单元体积分的微分;$F_i(i=1,2,3)$为各部分端点受力;xy 标识分量方向;m、n、ξ_2、ξ_3 所代表物理意义如图 7 所示。

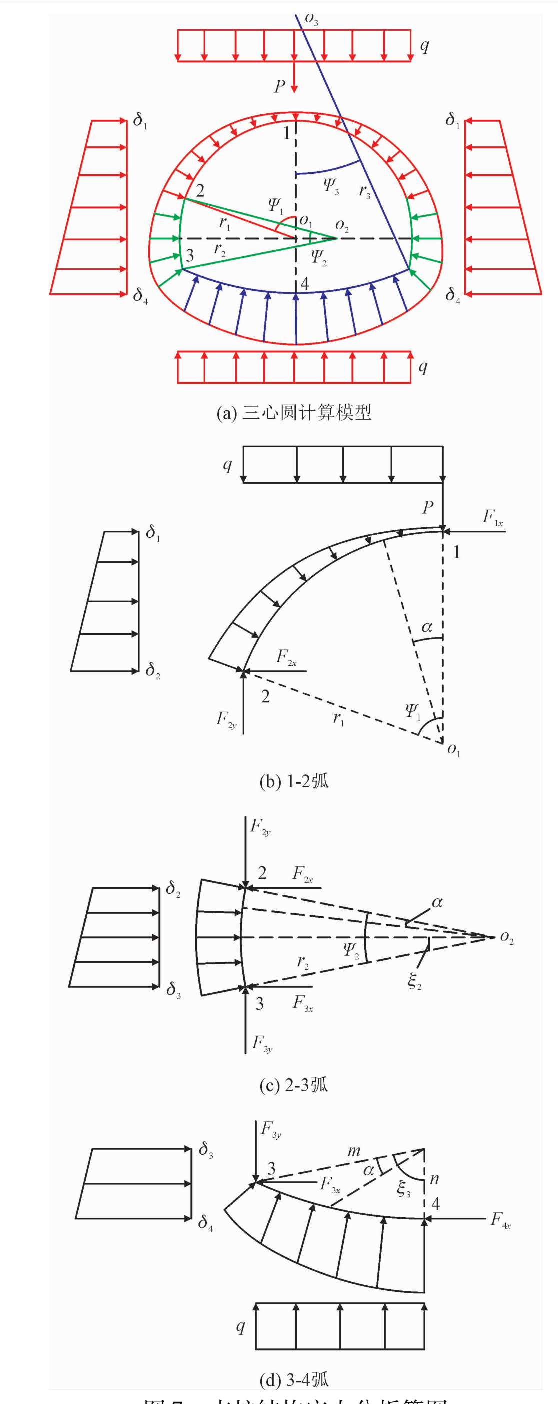


图 7 支护结构应力分析简图

Fig. 7 Internal force of supporting structure

解 1-2 弧,

由 $\sum X = 0$ 得到

$$F_{1x} + F_{2x} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} r_1(1 - \cos\psi_1) + \frac{r_1}{\psi_1}\int_0^{\psi_1} A\sin\alpha\mathrm{d}\alpha \quad (5)$$

其中,$A = \delta_i\psi_i + (\delta_{i+1} - \delta_i)\alpha$,$(i=1,2)$。

由 $\sum Y = 0$ 得

$$F_{2y} = \frac{P}{2} + qr_1\sin\psi_1 + \frac{r_1}{\psi_1}\int_0^{\psi_1} A\cos\alpha\mathrm{d}\alpha \quad (6)$$

由 $\sum M_2 = 0$ 得

$$F_{1x}r_1\cos\psi_1 = \frac{P}{2}r_1\sin\psi_1 + \frac{q}{2}(r_1\sin\psi_1)^2 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{6}[r_1(1 - \cos\psi_1)]^2 + \frac{r_1^2}{\psi_1}\int_0^{\psi_1} A\sin(\psi_1 - \alpha)\mathrm{d}\alpha \quad (7)$$

解 2-3 弧,

由 $\sum X = 0$ 得

$$F_{2y} + F_{3y} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2}[r_2\sin\xi_2 + r_2\sin(\psi_2 - \xi_2)] + \frac{r_2}{\psi_2}\int_0^{\psi_2} A\cos\alpha\mathrm{d}\alpha \quad (8)$$

由 $\sum Y = 0$ 得

$$F_{2y} = F_{3y} + \frac{r_2}{\psi_2}\int_0^{\psi_2} A\sin\alpha\mathrm{d}\alpha \quad (9)$$

由 $\sum M_3 = 0$ 得

$$F_{2y}[r_2\cos(\psi_2 - \xi_2) - r_2\cos\xi_2] + F_{2x}[r_2\sin\xi_2 + r_2\sin(\psi_2 - \xi_2)] = \frac{\delta_2 + \delta_3}{6}[r_2\sin\xi_2 + r_2\sin(\psi_2 - \xi_2)]^2 + \frac{r_2^2}{\psi_2}\int_0^{\psi_2} A\sin(\psi_2 - \alpha)\mathrm{d}\alpha \quad (10)$$

解 3-4 弧，

由 $\sum X = 0$ 得，

$$F_{3x} + F_{4x} = \frac{\delta_3 + \delta_4}{2} n + \frac{m}{\xi_3} \int_0^{\xi_3} B \sin\alpha \mathrm{d}\alpha \quad (11)$$

其中，$B = \delta_3 \xi_3 + (\delta_4 - \delta_3)\alpha$。

由 $\sum Y = 0$ 得

$$F_{3y} = \frac{P}{2} + qm\sin\xi_3 + \frac{m}{\xi_3} \int_0^{\xi_3} B \cos\alpha \mathrm{d}\alpha \quad (12)$$

由 $\sum M_4 = 0$ 得

$$F_{3y} m\sin\xi_3 + F_{3x}(n - m\cos\xi_3) = \frac{\delta_3 + \delta_4}{6} n^2 + \frac{q}{2}(m\sin\xi_3)^2 + \frac{m^2}{\xi_3} \int_0^{\xi_3} B \sin(\xi_3 - \alpha) \mathrm{d}\alpha \quad (13)$$

由此，可根据实际工程地质及隧道某断面支护方案，通过式（5）~（13）所示方程解得 δ_2、δ_3、F_{1x}、F_{2x}、F_{3x}、F_{4x}、F_{1y}、F_{2y}应力分量，可以计算得出支护结构中各节点受力及结构支护应力解析解。

3　工程应用

为了验证本研究提出的改进山本法模型，本研究选定依托工程中的隧道围岩大变形段某断面，采用山本法、改进山本法、公路隧道设计规范 JTGD70/2-2014 电算法以及现场实测法，4 种方法对支护结构应力进行对比分析。

3.1　断面参数

所采用的 4 种方法都是对红黏土隧道围岩大变形段同一断面为例进行分析，根据该隧道设计要求，在该断面支护结构应力计算中所用到的共同关键参数如表 3 所示。

表 3　断面关键参数

Tab. 3　Key parameters of section

名称	数据	名称	数据
底拱半径/m	1 234.57	围岩土质黏聚力/kPa	53.62
底拱半中心角/(°)	24.00	围岩土质重度/(kN·m^{-1})	21.70
侧拱半径/m	698.69	围岩土质内摩擦角/(°)	21.55
侧拱角度/(°)	26.00	围岩土质含水率/%	34.60
顶拱半径/m	524.31	破裂面摩擦角/(°)	2.37
顶拱半中心角/(°)	70.00	衬砌厚度/m	0.45
隧道埋深/m	26.00	均布荷载/(kN·m^{-1})	0.00
隧道高度/m	8.50	集中荷载/kN	0.00
隧道最大宽度/m	10.25		

3.2　算例分析

所采用的 4 种方法主要区别于围岩压力计算理论和支护结构模型 2 方面，如表 4 对比所示。计算中所采用的共同计算参数根据表 3 取值，特有的计算参数分别在文中叙述，所得计算结果汇总于 3.3 节进行对比分析。

表 4　计算方法对比分析

Tab. 4　Comparative analysis of calculation methods

计算方法	围岩压力		支护结构模型
	围岩压力理论	围岩参数	
山本法	隧道设计规范	围岩等级分级	正圆形
改进山本法	谢家烋围岩理论	室内试验实测	三心圆
规范电算法	隧道设计规范	围岩等级分级	马蹄形
实测结果	土压力盒实测	室内试验实测	-

1）山本法算例

采用山本法[5]对依托工程大变形该断面支护结构进行应力计算。其围岩压力根据公路隧道设计规范确定；因其计算结构为正圆环，简化后取等效半径 $r = 524.31$ cm。

2）改进山本法算例

首先，通过室内试验得到的隧道围岩原位红黏土物理力学参数，根据前文所述谢家烋围岩压力计算理论，得到该断面围岩压力。其次，根据隧道设计要求中该断面设计参数，采用式（5）~（13）求解得到每段弧截面的应力分量。最后，将所得计算结果汇总于 3.3 节对比分析中。

3）公路隧道设计规范电算法算例

采用理正隧道衬砌设计工具箱对依托工程红黏土大变形围岩段该断面进行电算分析，电算模型中

隧道支护结构为马蹄形计算模型,围岩压力根据公路隧道规范 JTGD70/2-2014 确定,隧道断面参数取值参照表 2 数据。由理正电算软件分步迭代 10 次,校核 4 次,达到各点抗力条件与法向位移一致,得到该断面支护结构轴力图、剪力图和弯矩图如图 8 所示。

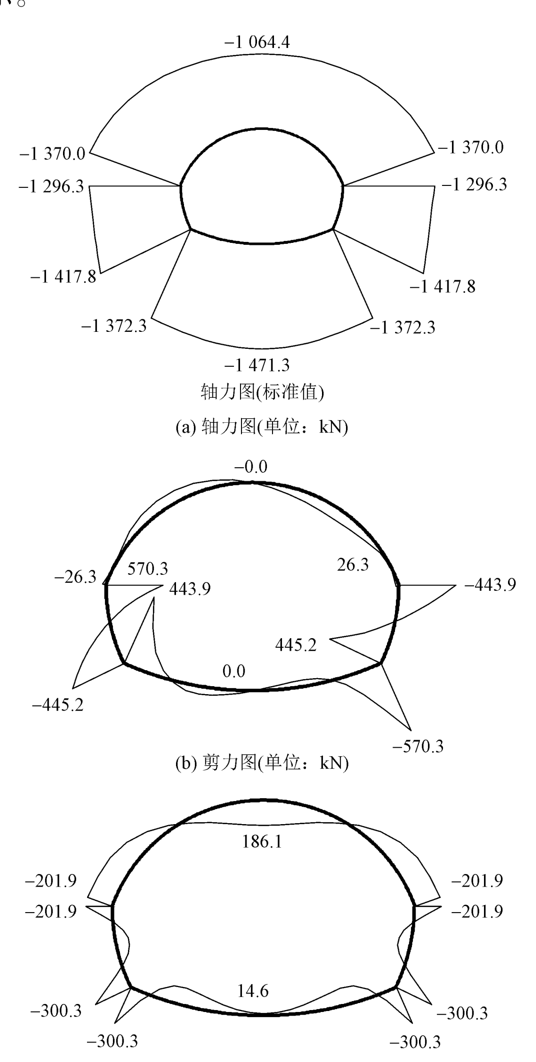


图 8　软件计算结果

Fig. 8　Calculation results of software

4)现场实测法结果

为得到所依托工程的红黏土围岩断面现场围岩压力与支护结构应力数据,开挖阶段在围岩与支护之间埋设土压力盒和钢筋表面铺设应变计进行测量。

①围岩压力测定

压力盒与围岩和支护结构紧密接触且平稳,不损伤压力盒及引线,表面使用直径大于压力盒直径 2 ~ 3 cm 的沙袋,覆盖于压力盒表面,再喷射混凝土,安装示意图如图 9 所示。



图 9　围岩压力盒安装示意图

Fig. 9　Installation diagram of pressure box of surrounding rock

压力盒在拱顶 P_1、左拱腰 P_2、右拱腰 P_3、左拱脚 P_4 和右拱脚 P_5 布置埋设好后,根据围岩变形情况监测 17 d,每个压力盒每天实测读数不少于 3 次,并做好原始记录,根据表 5 计算得出实测围岩压力值。

②支护结构应力测定

将表面应变计均匀粘接布置在拱架内侧,断面布置 16 个测点,通过读取测试各点测试频率读数得到每测点应变,由应变与应力换算关系(表 5),得到现场钢拱架支护应力实测值,如图 10 所示。



图 10　现场实测钢架应力计

Fig. 10　Stress measurement of steel frame

表 5　测量参数和计算方法

Tab. 5　Measurement parameters and calculation methods

测定值	项目	计算方式
围岩压力	率定系数 K/(MPa · Hz^{-2})	2.10×10^{-7}
	压力计初频/Hz	$f_0 = 1\,240.3$
	围岩压力/MPa	$P_1 = K \times (f_i^2 - f_0^2)$
支护结构应力	率定系数 K/(με · Hz^{-2})	1.08×10^{-5}
	应力计初频/Hz	$f_0 = 1\,008.6$
	应变计算公式	$\varepsilon = K(f_1^2 - f_0^2)$
	应力转化关系	$P_2 = E\varepsilon$

3.3　计算结果汇总对比

将山本法、改进山本法、公路隧道设计规范电算法计算结果和现场实测结果，所得到的 4 种结果汇总并绘制成图 11～13 所示的围岩压力和支护结构应力图。图 11～13 中 x 轴为支护结构截面与隧道竖轴线的夹角，0°表示拱顶，180°表示拱底。

由图 11 可知，实测围岩压力和改进山本法计算结果均表明支护结构所受围岩压力在拱顶和拱脚位置处较大，分别约为 269.8、283.8 kPa，改进山本法计算结果与实测结果相比误差为偏大 5.19%；山本法和公路隧道设计规范电算法结果中围岩压力最大值均出现在拱顶处，为 184.45 kPa，与实测围岩压力结果相比误差偏小 31.6%。其中规范法在计算中根据围岩等级取范围值，与现场围岩实际参数存在差异，使计算结果与实测数据存在偏差。

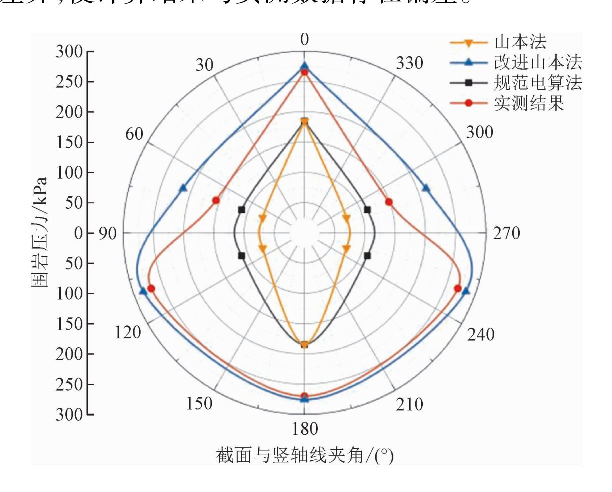


图 11　围岩压力计算结果对比

Fig. 11　Comparison of surrounding rock pressure

由图 12 可知，4 种计算结构轴力结果分布趋势基本一致，最大值均出现在拱底处。实测支护结构轴力最大值为 1 642.6 kN，山本法为正圆形模型所受轴力最小且均匀，其最大值为 1 457.0 kN，较实测结果偏小 11.3%；公路隧道设计规范电算法计算结果在拱腰处较其余计算结果偏大，但最大值仍出现于拱底，其值为 1 471.3 kN，较实测值偏小 10.4%；改进后山本法计算结果与实测值最为吻合，除左侧拱腰以外，其余位置计算值均大于实测值，拱底最大值为 1 855.3 kN，较实测值偏大 12.9%。

从图 11～12 可以看出山本法计算结果、公路隧道设计规范电算法计算结果、实测法结果和改进后山本法计算结果呈现依次增大趋势。这是因为根据公路隧道规范中围岩等级划分，仅确定了围岩土质黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的取值范围，据此设计对于控制围岩变形而言是不安全的。采用本研究提出的考虑围岩红黏土 c、φ 值的改进山本法，计算结果整体略大于现场实测结果，这表明所得计算结果是趋于安全可靠的。

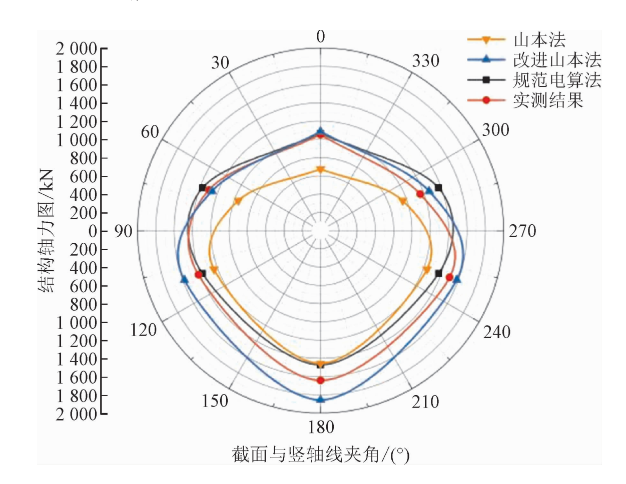


图 12　轴力计算结果对比

Fig. 12　Comparison of axial force calculation results

由图 13 可知，由山本法和规范电算法得到的结构弯矩最大值主要分布于结构上半部；改进后山本法计算结果中弯矩最大值出现于拱脚处，与现场拱脚处钢拱架变形现象一致。

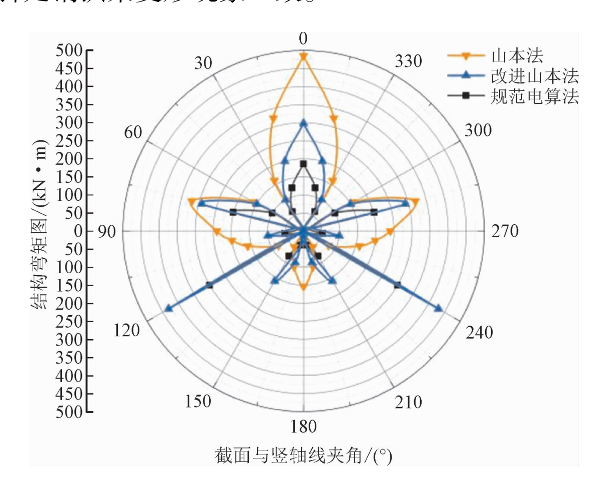


图 13　弯矩计算结果对比

Fig. 13　Comparison of moment calculation results

由此说明，本研究提出的计算方法更接近于现场实测数据。其根本原因是三心圆模型比正圆形模型与现场隧道支护结构更一致，其内在的物理机制是本研究方法结合了准确的现场实测围岩土质黏聚力和内摩擦角，使得本研究计算结果更为接近实测数据。

根据上述分析结果,依托工程中支护结构所受应力过大,不能抵抗红黏土围岩变形,导致出现围岩大变形,在施工过程中应当考虑:①该断面需加强拱脚处支护,采用二次喷射混凝土或者加强锁脚锚管强度;尽早施做仰拱,使其断面护结构封闭成环。②后续开挖施工工法可调整为三台阶七部预留核心土法,减小拱脚受力。③在侵限变形严重断面,需二次换拱时宜适当提高钢拱架强度等级。

由于隧道工程施工中常穿越不同地层结构,围岩参数的变化对支护结构应力影响明显,需要根据围岩参数确定围岩压力后采用适合的计算模型,得到更加准确的支护结构应力值。

4 结 论

本研究提出了一种改进山本法隧道支护结构受力计算模型,应用于浅埋山岭隧道支护结构受力分析,并提出优化支护方案。得到以下主要结论。

1)结合谢家烋围岩压力理论,对日本山本法结构应力计算模型进行改进,提出了一种考虑隧道围岩土质参数黏聚力 c、内摩擦角 φ 的三心圆隧道支护结构应力计算模型。

2)根据工程算例对山本法、改进山本法、公路隧道设计规范电算法和现场实测法的结果进行对比分析,验证了改进山本法的合理性。

3)根据改进后山本法计算结果,可以估算出支护结构拱脚处为薄弱位置,为提前采取加固措施提供理论依据。

参考文献:

[1] 张春洪,李世鑫,王元森,等. 软弱地层浅埋大跨双连拱隧道支护结构受力现场监测试验研究[J]. 土木工程学报,2017,50(增刊2):51-57.
ZHANG Chunhong, LI Shixin, WANG Yuansen, et al. Study on structure stress of large-span shallow-buried double-arch tunnel in weak stratum by in-situ monitoring test[J]. China civil engineering journal,2017,50(S2):51-57(in Chinese).

[2] 李又云,钟乃龙,赵亚伟,等. 支护条件下软岩隧道小型拱形塌腔围岩变形分析[J]. 应用力学学报,2018,35(1):116-122.
LI Youyun, ZHONG Nailong, ZHAO Yawei, et al. Deformation of small arch collapsed cavities in soft rock tunnel under supporting conditions[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018, 35(1):116-122(in Chinese).

[3] DO N A, DIAS D, ORESTE P. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground[J]. Tunnelling and underground space technology,2014,42:40-51.

[4] 张德华,刘士海,任少强. 三台阶七步法施工高地应力隧道支护结构受力特性分析[J]. 现代隧道技术,2016,53(1):96-102.
ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Analysis of the force applied on the support structure in a high-geostress tunnel constructed by the three-bench seven-step method[J]. Modern tunnelling technology,2016,53(1):96-102(in Chinese).

[5] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[6] 陈秋南,曾奥,罗鹏,等. 圆宝山隧道炭质板岩大变形段初期支护结构受力特性研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(2): 810-817.
CHEN Qiunan, ZENG Ao, LUO Peng, et al. Study on mechanical characteristics of initial supporting structure of large deformation section of carbonaceous slate in Yuanbaoshan tunnel[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(2):810-817(in Chinese).

[7] BARTON N, GRIMSTAD E, AAS G, et al. Norwegian method of tunnelling[J]. World tunnelling,1992,5(5):231-232,235-238.

[8] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1997,34(8):1165-1186.

[9] 谢家烋. 浅埋隧道的地层压力[J]. 土木工程学报,1964(6): 58-70.
XIE Jiaxiao. Stratigraphic pressure in shallow tunnels[J]. China civil engineering journal,1964(6):58-70(in Chinese).

[10] 于丽,吕城,段儒禹,等. 浅埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学,2019,40(4):69-76.
YU Li, LÜ Cheng, DUAN Ruyu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow buried loess tunnel[J]. China railway science,2019,40(4):69-76(in Chinese).

[11] 李君杰,陈秋南,邹根,等. 考虑宏细观损伤的隧道裂缝区围岩弹塑性分析[J]. 应用力学学报,2020,37(3):1106-1114.
LI Junjie, CHEN Qiunan, ZOU Gen, et al. Elastoplastic analysis of surrounding rock in crack zone of tunnel considering macro-mesoscopic damage factor[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020,37(3):1106-1114(in Chinese).

[12] 邵珠山,吴奎,胡宏坤,等. 注浆加固和可压缩层联合作用下隧道力学行为研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2021-2028.
SHAO Zhushan, WU Kui, HU Hongkun, et al. On the analysis of combined supporting effects of grouting reinforcement and compressible layer on mechanical behavior of tunnel[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2021-2028(in Chinese).

[13] 高卫亮,王光勇,张运强. 在侧爆作用下既有山岭隧道支护结构动态响应分析[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2297-2302.

GAO Weiliang, WANG Guangyong, ZHANG Yunqiang. Dynamic response of existing mountain tunnel support structure under side explosion[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(5): 2297-2302(in Chinese).

[14] 文竞舟，张永兴，王成. 基于接触应力反分析的隧道初期支护结构内力研究[J]. 岩土力学，2011，32(8)：2467-2472.
WEN Jingzhou, ZHANG Yongxing, WANG Cheng. Back analysis of internal force of initial support in tunnel based on touch stress[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(8): 2467-2472(in Chinese).

[15] 张翔，李林安，王世斌，等. 考虑底部隆起的浅埋隧道围岩压力计算分析[J]. 应用数学和力学，2017，38(8)：911-921.
ZHANG Xiang, LI Linan, WANG Shibin, et al. Limit analysis of surrounding rock pressure for shallow tunnels considering floor heave[J]. Applied mathematics and mechanics, 2017, 38(8): 911-921(in Chinese).

[16] OSMAN A S, MAIR R J, BOLTON M D. On the kinematics of 2D tunnel collapse in undrained clay[J]. Géotechnique, 2006, 56(9): 585-595.

[17] 孙富学，蔡晓鸿，朱云辉. 基于初参数法的多心圆拱隧道衬砌结构内力与变位求解[J]. 岩土力学，2009，30(4)：1127-1130.
SUN Fuxue, CAI Xiaohong, ZHU Yunhui. Analytical solution of internal force and displacement in multi-center circular arc tunnel lining based on initial parameter method[J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(4): 1127-1130(in Chinese).

[18] 陈一鑫，崔根群，宋林. 多心圆拱隧道支护结构内力反演分析的理论研究[J]. 现代隧道技术，2018，55(1)：85-91.
CHEN Yixin, CUI Genqun, SONG Lin. Back analysis of the internal force on the supporting structure of a multi-centered circular arch tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2018, 55(1): 85 – 91 (in Chinese).

（编辑　史淑英）